

文章编号:1001-9014(2004)02-0125-06

# 一种新颖的基于 MEMS 技术的光读出热成像系统性能分析与制作

冯 飞, 焦继伟, 熊 斌, 王跃林

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感技术国家重点实验室, 上海 200050)

**摘要:**提出了一种新颖的光读出红外热成像系统设计. 该系统利用光学读出技术将红外图像直接转化为可见光图像, 其核心部件是一个基于微电子机械技术(MEMS)制作的法布里-珀罗(Fabry-Perot)微腔红外探测器阵列(F-P MCIRDA). 通过对 Au/SiNx 双材料体系的理论分析, 得出了可动微镜的最大热-机械灵敏度、机械-光灵敏度及其温度响应分别为  $6.47 \times 10^{-9} \text{ m/K}$ 、 $1.53 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$ 、 $2.05 \times 10^{-4}$ . 对系统噪声分析表明: 在目前的设计中, 系统的噪声等效温差(NETD)为 5.1K, 而其极限值有望达到 58mK. 采用体硅 MEMS 工艺, 制作出了  $50 \times 50$  的 Fabry-Perot 微腔阵列. 实验表明, 在红外辐射作用下, 可动微镜有明显的位移, 验证了工作原理.

**关键词:**微电子机械技术; 光读出热成像; Fabry-Perot 微腔红外探测器阵列; 噪声等效温差

**中图分类号:** TN216 **文献标识码:** A

## DESIGN AND FABRICATION OF A NOVEL OPTICALLY READABLE THERMAL IMAGING SYSTEM BASED ON MEMS TECHNOLOGY

FENG Fei, JIAO Ji-Wei, XIONG Bin, WANG Yue-Lin

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Science, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** A novel optically readable infrared thermal imaging system that directly translates infrared image into visible image by using optically readable technology was presented. Its key part is a Fabry-Perot Micro-Cavity Infrared Detector Array (F-P MCIRDA) based on MEMS (micro-electro-mechanical system) technology. Maximal thermo-mechanical, opto-mechanical sensitivity and temperature response of the movable micromirror are  $6.47 \times 10^{-9} \text{ m/K}$ ,  $1.53 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$  and  $2.05 \times 10^{-4}$ , respectively, as theoretical analysis results for bi-material Au/SiNx. System noise analysis indicates that the NETD of the present design and the expected limit of the NETD are 5.1K and 58mK, respectively. A  $50 \times 50$  F-P MCIRDA has been successfully fabricated by using bulk MEMS technology. The initial measurement results indicate that obvious displacement of the moveable micromirrors can be observed as the infrared radiation irradiates on. The operating principle of this system is verified successfully.

**Key words:** micro-electro-mechanical system (MEMS); optically readable thermal imaging; Fabry-Perot Micro-Cavity Infrared Detector Array; noise-equipment temperature difference

### 引言

红外成像器件的应用范围很广, 在军事领域可用于夜视、导弹制导等, 在民用方面可用于医疗诊

断、工业检测和遥感遥测等. 红外成像器件可分为热型和量子型二大类, 非制冷红外成像焦平面阵列技术是当前一个研究热点, 其最大的优点是可以在室温工作. 一般而言, 热型红外成像器件对绝热性能

收稿日期: 2003-06-06, 修回日期: 2003-11-11

Received date: 2003-06-06, revised date: 2003-11-11

基金项目: 国家“九七三”集成微光机电系统研究资助项目(G1999033101)

作者简介: 冯飞(1973-), 男, 湖北当阳人, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感技术国家重点实验室博士研究生, 主要从事基于 MEMS 的红外热成像技术研究.

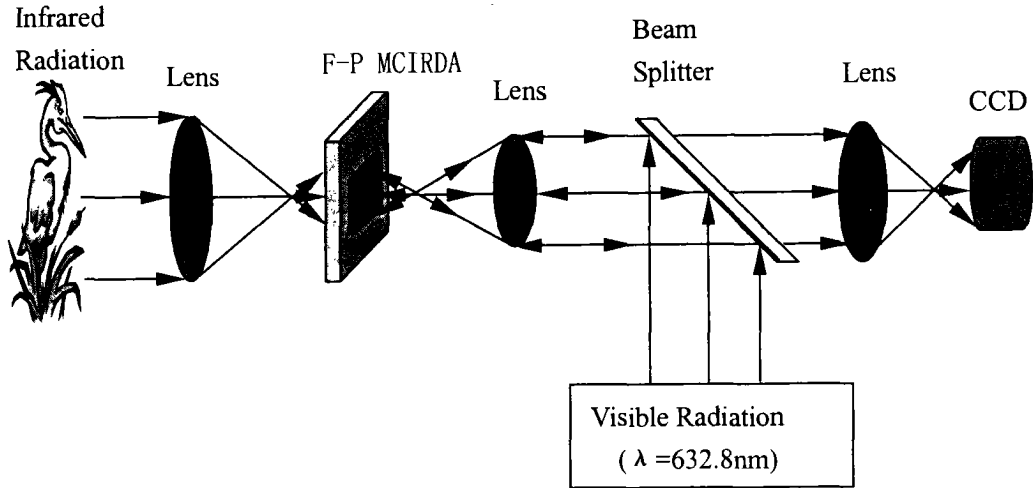


图1 光读出热成像系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the optically readable thermal imaging system

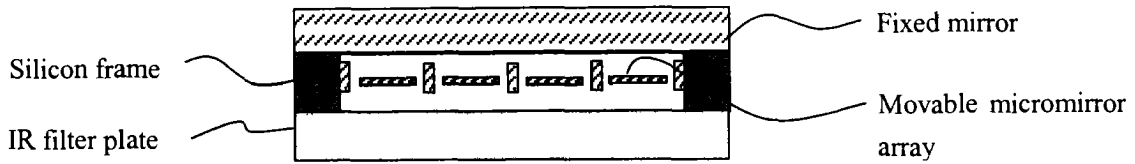


图2 F-P MCIRDA 结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the F-P MCIRDA

要求较高,而微机械技术(MEMS)在制作具有较高的绝热性能的悬空结构方面具有独特的优势.随着MEMS技术和IC技术的发展,热—电阻型<sup>[1]</sup>、热—电容型<sup>[2]</sup>、热电偶型<sup>[3]</sup>等热成像系统均已相继被报道,其共同特点是用MEMS技术制作绝热性能良好的敏感元件,利用红外的热效应先将红外信号转化为电信号,再通过CMOS电路检测电信号从而得到图像信号.但复杂的信号读取电路使得器件的价格无法进一步降低,于是人们开始寻找开发新兴的替代技术,光读出热成像系统便成为新的研发热点<sup>[4-7]</sup>.

本文提出了一种新颖的光读出热成像系统.该系统中用MEMS技术制作的Fabry-Perot微腔红外探测器(F-P MCIRDA)列阵相当于传统意义上的FPA. Fabry-Perot微腔的一个反射面是一个由双材料弯折梁支撑的可动微镜,当含有被探测目标温度分布信息的红外辐射经光学系统成像在F-P MCIRDA上时,可动微镜温度升高,双材料弯折梁受热弯曲带动可动微镜上下运动,改变微腔两反射面之间的距离,对输出可见光光强进行调制,从而将红外辐射转化为了可见光图像.

## 1 光读出热成像系统、F-P MCIRDA 及像素结构

如图1所示,系统结构主要包括三部分:红外光学系统;F-P MCIRDA;可见光读出系统(由激光器、半透镜和CCD构成).红外光学系统将入射红外辐射汇聚于F-P MCIRDA上.F-P MCIRDA结构示意图如图2所示,主要由固定镜面、可动微镜列阵、硅框架、滤波片构成,可动微镜列阵和固定镜面构成了 $m \times n$ 的Fabry-Perot微腔列阵.每个可动微镜就是一个像素,单元像素结构如图3所示,可动微镜镜面由4根固定在硅基片上的双层材料弯折梁支撑着.镜面有二方面的作用:一是反射可见光,二是吸收红外辐射.可动微镜以及四周的弯折梁均是由Au/SiNx双层材料构成,主要是基于以下两个方面的考虑:一是Au在可见光波段反射率较高,SiNx在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 的红外波长范围内存在红外吸收峰;二是Au和SiNx热膨胀系数相差较大,当温度变化时,由Au/SiNx构成的双材料弯折梁容易引起弯曲形变.

红外辐射经红外光学系统从F-P MCIRDA的滤波片一侧入射到可动微镜上,可动微镜吸收红外辐

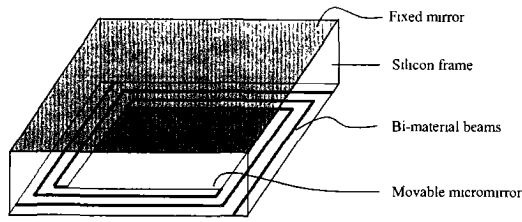


图3 单元像素图

Fig.3 Schematic diagram of a single pixel

射后温度升高,导致镜面区域与弯折梁的固定端的存在一个温度梯度,双层材料弯折梁将发生弯曲形变,带动镜面上下运动,改变了可动微镜与固定镜面之间的距离,当微镜的位移在  $0 \sim 1/4 \cdot \lambda$  内变化时,反射光强随之单调变化,我们用 CCD 相机或者眼睛、光屏就可以接收到可见光图像。通过上述过程,就实现了从红外图像向增强的可见光图像的转变,其图像的获取过程可简单地表示为:红外信号→可动微镜位移→可见光信号,而不是传统的红外图像→电图像→可见光图像。

## 2 F-P MCIRDA 性能分析

### 2.1 可动微镜的热—机械灵敏度与机械—光灵敏度

在红外辐射作用下可动微镜能发生多少位移—即可动微镜热—机械灵敏度,是器件的关键性能。我们采用一个近似的理论—双层材料悬臂梁理论来计算可动微镜的热—机械灵敏度,当点热源作用在悬臂梁的末端时,悬臂梁的热—机械灵敏度  $S$  可表示为<sup>[8,9]</sup>

$$S = (\alpha_2 - \alpha_1) \left( \frac{n+1}{K} \right) \left( \frac{l^2}{t_2} \right). \quad (1)$$

式(1)中角标 1、2 分别表示金属薄膜、非金属薄膜的各个参量,  $\alpha$  表示热膨胀系数,  $t$  表示薄膜厚度,  $l$  表示悬臂梁的长度,厚度此  $n = t_1/t_2$ ,  $K = 4 + 6n + 4n^2 + \phi n^3 + 1/\phi n$ , 其中  $\phi$  为 2 种材料的杨氏模量之比:  $\phi = E_1/E_2$ 。

从式(1)可以看出,悬臂梁的热—机械灵敏度由 2 个方面决定:材料热膨胀系数和器件几何尺寸。两种材料的热膨胀系数相差越悬殊,梁越长,非金属厚度  $t_2$  越小时,悬臂梁的热—机械灵敏度越大。当材料选定,  $l, t_2$  确定后,双层材料的厚度比将影响悬臂梁的热—机械灵敏度。以 Au/SiNx 为例,取  $l = 162 \mu\text{m}$ ,  $t_2 = 1 \mu\text{m}$ , 存在一个最佳厚度比  $n = 0.742$ , 使得 Au/SiNx 双材料悬臂梁热—机械灵敏度有最大

值  $S = 6.465 \times 10^{-9} \text{m/K}$ 。为了获得最大的热—机械灵敏度,取 SiNx 厚度为  $1 \mu\text{m}$ , Au 的厚度为  $0.75 \mu\text{m}$ , 同时考虑到工艺条件的限制,双材料弯折梁的宽度  $w$  取为  $2 \mu\text{m}$ , 可动微镜为  $70 \mu\text{m}$  的正方形,弯折梁长  $l$  为  $162 \mu\text{m}$ 。理论计算中所涉及材料的相关参数见文献[4]。

可动微镜的机械—光灵敏度定义为:  $\beta = (dI/d\delta)/I_0$ , 它描述了可动微镜的单位位移所引起的出射可见光强度的变化。

Fabry-Perot 腔的反射光强为

$$I_R = I_0 \cdot \frac{ri + RI - 2\sqrt{RI \cdot ri} \cos(4\pi(h_0 + \delta)/\lambda)}{1 + RI \cdot ri - 2\sqrt{RI \cdot ri} \cos(4\pi(h_0 + \delta)/\lambda)}. \quad (2)$$

式(2)中  $I_0$  是入射光强度,  $ri, RI$  分别是 Fabry-Perot 腔上下 2 个表面的光强反射率,  $h_0$  是 Fabry-Perot 腔两反射面之间的初始距离,  $\delta$  是可动微镜接收红外辐射后所发生的位移,  $\lambda$  是入射可见光波长。由式(2)可得机械—光灵敏度为

$$\beta = \frac{8\pi\sqrt{RI \cdot ri}(1 + RI \cdot ri - ri - RI)\sin(4\pi(h_0 + \delta)/\lambda)}{\lambda(1 + RI \cdot ri - 2\sqrt{RI \cdot ri} \cos(4\pi(h_0 + \delta)/\lambda))^2}. \quad (3)$$

取  $RI = ri = 0.9$ ,  $h_0 = 3.16 \mu\text{m}$ , 可动微镜的最大机械—光灵敏度为  $\beta = 1.53 \times 10^8 \text{m}^{-1}$ 。

在作系统噪声分析时我们将用到最大热—机械  $S$  和机械—光灵敏度  $\beta$ 。

### 2.2 可动微镜的温度响应<sup>[10]</sup>

可动微镜热设计的根本目的在于,红外辐射源单位温度的变化能引起 F-P MCIRDA 上红外敏感区域(可动微镜区域)最大的温度变化,即可动微镜的温度响应值应最大化。经推导可得可动微镜的温度响应值:

$$\frac{\delta T_m}{\delta T_s} = \frac{1}{G_{total}} \cdot \frac{A_m \tau \varepsilon \pi}{4F_{no}^2} \frac{dL}{dT_s}. \quad (4)$$

式(4)体现了二方面的内容:一方面可动微镜接收红外辐射,由可动微镜面积  $A_m$ , 总的发射率  $\varepsilon$ 、红外光学系统的透过率  $\tau$ 、红外光学系统的  $F$  数为  $F_{no}$  以及  $dL/dT_s$  ( $L, T_s$  分别表示辐亮度与红外辐射源温度,在  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  的范围内,黑体在 300K 时,  $dL/dT_s = 0.83 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ) 这些因素决定;另一方面,可动微镜还向周围环境散发热量,主要由可动微镜和周围环境之间的总热导决定;这二方面的因素共同决定了可动微镜的温度响应值。

从式(4)可知,为了提高可动微镜的温度响应  $\delta T_m/\delta T_s$ , 我们应该尽可能地降低可动微镜与周围环

表 1 可动微镜的温度响应值及相关参数

Table 1 Temperature response of the movable micromirror and interrelated parameters

$dT_m/dT_s$	$G_{rad}$ (W/K)	$G_{leg}$ (W/K)	$A_m$ ( $\mu\text{m}^2$ )	$\tau$	$\varepsilon$	$F_{no}^2$	$dL/dT_s$ ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{Sr}^{-1}$ )
$2.05 \times 10^{-4}$	$2.43 \times 10^{-8}$	$11.2 \times 10^{-6}$	$70 \times 70$	0.9	0.8	1	0.83

境之间的热导,故器件采用真空封装.在真空环境中,可动微镜总热导包含二项

$$G_{total} = G_{leg} + G_{rad}, \quad (5)$$

其中, $G_{leg}$ 是可动微镜和硅衬底之间通过双材料弯折梁的热导:

$$G_{leg} = 4 \cdot \frac{(t_{SiNx} k_{SiNx} + t_{Au} k_{Au}) w}{L_{leg}} = 11.2 \times 10^{-6} \text{W/K}, \quad (6)$$

式(6)中  $k$  为材料的热导率.

$G_{rad}$ 是可动微镜和周围环境之间的辐射热导:

$$G_{rad} = 4A_m (\varepsilon_{SiNx} + \varepsilon_{Au}) \sigma T_a^3 = 2.43 \times 10^{-8} \text{W/K}, \quad (7)$$

其中,发射率  $\varepsilon_{SiNx} = 0.8$ ,  $\varepsilon_{Au} = 0.01$ , Stefan-Boltzmann 常数  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

可动微镜的温度响应值及相关参数如表 1 所列.

式(4)中,总的热导对可动微镜的温度响应影响最大,因此,我们应选择合适的材料并进行合理的结构设计,尽量降低可动微镜总的热导,以获得尽可能大的温度响应.

### 3 系统噪声分析

噪声等效温差 (Noise-equipment temperature difference) 决定了一个红外图像系统的性能. NETD 是当信噪比等于 1 时红外辐射源的等效温度变化. 该系统的噪声一方面来源于 F-P MCIRDA, 另一方面也与可见光读出系统相关, 主要包括: 1) 包括热振动和机械振动在内的双材料弯折梁振动噪声; 2) 像素的温度涨落噪声; 3) 激光器的噪声; 4) CCD 散粒噪声. 1 和 2 项属于 F-P MCIRDA, 是在我们进行 F-P MCIRDA 设计时主要要考虑的; 3) 和 4)  $\Delta T_{laser}$  项是由可见光读出系统引起的.

#### 3.1 振动噪声<sup>[11]</sup>

振动噪声包括二方面: 双材料弯折梁内部的热振动以及外界所带来的机械振动. 由外界所带来的机械振动问题可通过振动隔离系统得到有效地抑制, 如将器件置于光学平台上. 双材料弯折梁内部的热振动来源于  $k_B T$  热能:

$$\delta_{th,vib} = \sqrt{(4k_B T \Delta f) / (g \omega_0 Q)}, \quad (8)$$

其中,  $\Delta f$  是测量带宽, 对 CCD 探测器而言典型值为 30Hz;  $Q$  是品质因子, 在 1Pa 的气压下, 通过复杂的计算可得  $Q = 28\,064$ ;  $g$  是悬臂梁的弹性系数,  $\omega_0$  是系统的共振频率, 通过悬臂梁理论计算得  $g = 9.92 \times 10^{-2} \text{N/m}$ ,  $\omega_0 = 33\,602 \text{Hz}$ . 取  $T = 300 \text{K}$ ,  $\delta_{th,vib} = 7.29 \times 10^{-14} \text{m}$ , 利用式(9)可将其转化为等效温度涨落

$$\Delta T_{th,vib} = \delta_{th,vib} / S = 1.13 \times 10^{-5} \text{K}. \quad (9)$$

其中  $S = 6.46 \times 10^{-9} \text{m/K}$ . 从式(8)可以看出, 降低热振动噪声的关键在于可动微镜结构要有合适的弹性系数、共振频率及品质因子.

#### 3.2 温度涨落噪声<sup>[12]</sup>

任何热动态系统都有温度的随机涨落, 称之为温度涨落噪声. 由于器件与环境的热交换是不可避免的, 对任何非制冷红外系统热动态涨落噪声都是固有噪声.

对于一个可动微镜像素, 在低频范围内平均温度涨落为

$$\Delta T_{th,fluc} = \sqrt{4k_B T^2 B / G_{total}} = 3.64 \times 10^{-6} \text{K}. \quad (10)$$

其中,  $k_B$  ( $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ) 是玻耳兹曼常数,  $B$  是探测带宽 ( $= 30 \text{Hz}$ ),  $T$  是可动微镜温度 ( $300 \text{K}$ ).

3.1、3.2 分析表明, 可动微镜结构的品质因子、弹性系数、共振频率、热导直接决定了 F-P MCIRDA 的噪声水平. 从降低噪声、减小热响应时间角度出发,  $G_{total}$  越大越好, 但这必将导致可动微镜温度响应降低, 在设计时必须考虑要折衷考虑.

#### 3.3 激光器噪声

激光光源所引起的噪声是由于入射到 F-P MCIRDA 上激光强度的涨落引起的. 对于 5mW、输出波长为 632.8nm 的圆柱 He-Ne 激光器, 带宽为 30Hz 时, 噪声振幅  $\Delta I/I = 3 \times 10^{-4}$ , 利用式(11)转化为温度噪声

$$\Delta T_{laser} = (\Delta I/I)_{laser} / (S \cdot \beta) = 3.04 \times 10^{-4} \text{K}. \quad (11)$$

其中,  $\beta = 1.53 \times 10^8 \text{m}^{-1}$ . 从上述计算中可以看出选择合适的激光器对降低噪声的总体水平是至关重要的.

#### 3.4 CCD 噪声

CCD 的噪声源主要包括: 散粒噪声、转移噪声

和热噪声,其中散粒噪声决定了 CCD 的噪声极限值.这里我们主要分析散粒噪声的影响.

设 CCD 信号电荷包中的载流子数为  $N_s$ ,则由于  $N_s$  的随机变化而产生的散粒噪声为  $(N_s)^{1/2}$ .如果 CCD 相机的像素填充容量为  $6 \times 10^5$  个电子,则相应的散粒噪声为  $\Delta I/I \approx 1 \times 10^{-3}$ ,利用式(12)可转化为温度噪声

$$\Delta T_{CCD} = (\Delta I/I)_{CCD} / (S \cdot \beta) = 1.01 \times 10^{-3} \text{ K}. \quad (12)$$

与以上 3 个噪声源相比较,CCD 噪声占主导地位,为了降低整个系统的噪声水平,应选择合适的 CCD 相机.

### 3.5 总的噪声

温度涨落的总的噪声是上述所有噪声的统计平均.假设这些噪声统计不相关,总的噪声可表示为

$$\Delta T_{laser} = \sqrt{\sum \Delta T_i^2}. \quad (13)$$

如表 2 所列,总的噪声等于 1.05mK.

可动微镜的温度响应为:  $dT_m/dT_s = 2.05 \times 10^{-4}$ ,则整个系统的噪声等效温差为

$$\text{NETD} = \Delta T_{total} / (dT_m/dT_s) = 5.1 \text{ K}. \quad (14)$$

上述分析中可以看出,在目前的技术水平下,可见光读出部分的噪声是主要的.如果能使温度涨落噪声和热振动噪声在系统总噪声中居主导地位,则  $\Delta T'_{Total} = 1.19 \times 10^{-5} \text{ K}$ ,系统等效噪声温差可达

$$\text{NETD}' = \Delta T'_{Total} / (dT_m/dT_s) = 58 \text{ mK}. \quad (15)$$

对可动微镜结构作进一步改进,使得可动微镜总的热导降低 1~2 个数量级是完全可能的,即可动微镜的温度响应  $dT_m/dT_s$  可增大 1~2 个数量级,最终系统的 NETD 可达 mK 量级甚至 mK 量级以下.比较式(14)和式(15),降低噪声等效温差的空间还相当大.

## 4 F-P MCIRDA 芯片制作结果及初步实验测试

我们采用体硅 MEMS 技术,其中主要包括硅玻璃键合形成 Fabry-Perot 微腔,深反应离子(ICP)刻蚀释放可动微镜等工艺步骤,最后成功制作出了  $50 \times 50$  的 Fabry-Perot 微腔阵列.图 4 是可动微镜阵列照片,单元像素面积  $70 \times 70 \mu\text{m}^2$ ,相邻单元的中心距离为  $100 \mu\text{m}$ .图 5 是释放后的可动微镜的扫描电镜

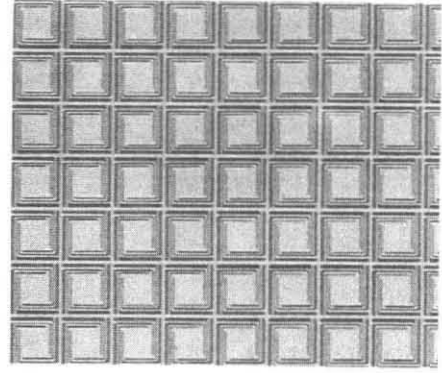


图 4 可动微镜阵列图

Fig. 4 Optical picture of the movable micromirror array

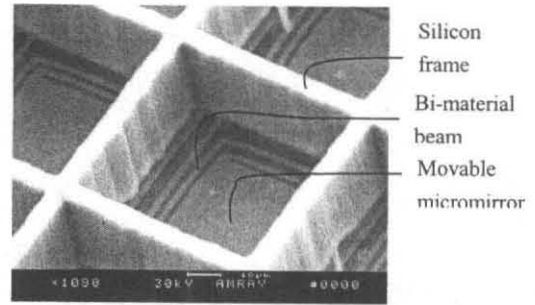


图 5 可动微镜扫描电镜图

Fig. 5 Scanning electron microscope (SEM) picture of a movable micromirror

图,由图可知,可动微镜已经被安全地释放.在 300W 的红外灯的照射下,在 WYKO(表面轮廓仪)下可观察到可动微镜有明显的位移,如图 6 所示.图 6(a)是没有红外辐射时可动微镜的表面轮廓图,只有一个亮斑,图 6(b)表明,在 300W 的红外灯的照射下,可动微镜的表面轮廓图上多出了几个干涉条纹,说明可动微镜在红外辐射作用下发生了明显的位移.

## 5 结论

本文提出了一种新颖的光读出热成像系统,完成了系统结构设计及 F-P MCIRDA 设计.通过理论分析得出了可动微镜的最大热-机械灵敏度、机械-光灵敏度及其温度响应.系统噪声分析声明,在目前的设计中,系统的 NETD = 5.1K,而其极限值可达 58mK.采用体硅 MEMS 工艺,制作出了  $50 \times 50$  的 Fabry-Perot 微腔阵列.初步实验表明,在红外辐射作用下,可动微镜有明显的位移,验证了工作原理.

表 2 系统噪声分析

Table 2 Noise analysis for this infrared imaging system

$\Delta T_{th,vib}(\text{K})$	$\Delta T_{th,fluc}(\text{K})$	$\Delta T_{Laser}(\text{K})$	$\Delta T_{CCD}(\text{K})$	$\Delta T_{Total}(\text{K})$
$1.13 \times 10^{-5}$	$3.64 \times 10^{-6}$	$3.04 \times 10^{-4}$	$1.01 \times 10^{-3}$	$1.05 \times 10^{-3}$

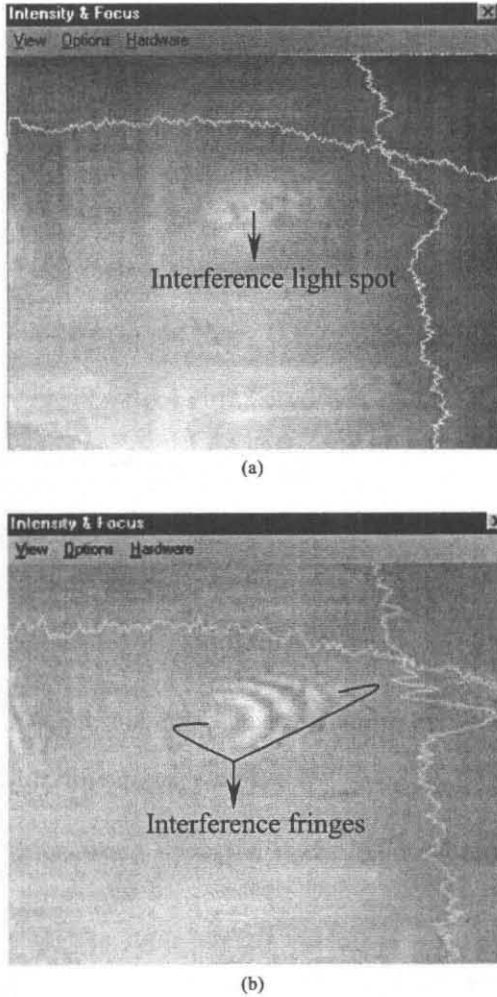


图6 可动微镜表面轮廓图(a)无红外辐射(b)有红外辐射时

Fig.6 Surface profile picture of a movable micromirror(a) no infrared radiation applied(b)infrared radiation applied

## REFERENCES

- [1] Nadim Maluf. *An Introduction to Microelectromechanical System Engineering*[M]. London: Artech house Boston London, 1999, 134—135
- [2] Amantea R, Kneedler C M, Pantuso F P, et al. An uncooled IR imager with 5mK NEDT[J]. *Proceeding of SPIE*, 1997
- [3] Chang D T, Chen D M, Lin F H, et al. CMOS Integrated Infrared Sensor[C]. Proceedings of the 1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators(Transducers'97), USA: Chicago, 1997, 2: 1259—1262
- [4] ZHANG Liu-Qiang. Studies on micromachined light modulating thermal image device[D]. PH. D Dissertation of Shanghai Institute of Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, March 2000. (张流强. 基于微机械的光调制热成像器件研究. 中国科学院上海冶金所博士学位论文, 2000, 3)
- [5] Manalis S R, Minne S C, Quate C F. Two-dimensional micromechanical bimorph arrays for detection of thermal radiation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 70(24): 3311—3313
- [6] Perazze T, Mao M, Kwon O, et al. Infrared vision using uncooled micro-optomechanical camera [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 74(23): 3567—3569
- [7] Tohro Ishiauya, Junji Suzuki, Keiichi Akagawa, et al. 160 × 120 pixels optically readable bimaterial infrared detector [J]. *Proceeding of IEEE MEMS*, 2002: 578—581
- [8] Lai J, Perazzo T, Shi Z, et al. Optimization and performance of high-resolution micro-optomechanical thermal sensors [J]. *Sensors and Actuator*. 1997, A58: 113—119
- [9] Barnes J R, Stephenson R J, Woodburn C N, et al. A femtojoule calorimeter using micromechanical sensors[J]. *Rev. Sci. Instrum.* 1994, 65(12): 3793—3798
- [10] Wood R A. Uncooled infrared imaging arrays and systems: Monolithic silicon microbolometer arrays[J]. *Semiconductors and Semimetals*, 1997, 47: 47—51
- [11] Sarid D. *Scanning Force Microscope with Application to Electric, Magnetic, and Atomic Forces*[M]. New York: Oxford University Press, 1991
- [12] Kruse P R. Uncooled infrared imaging arrays and systems: Principles of uncooled infrared focal plane arrays[J]. *Semiconductors and Semimetals*, 1997, 47: 31—37